

RAZGLEDI

OD KAKOVOSTI TAL DO EKOSISTEMSKIH STORITEV TAL

AVTORJI

dr. Marjetka Suhadolc

Univerza v Ljubljani, Biotehniška fakulteta, Jamnikarjeva 101, SI – 1000 Ljubljana
marjetka.suhadolc@bf.uni-lj.si, <https://orcid.org/0000-0003-1550-1636>

Anton Govednik

Univerza v Ljubljani, Biotehniška fakulteta, Jamnikarjeva 101, SI – 1000 Ljubljana
anton.govednik@bf.uni-lj.si, <https://orcid.org/0000-0001-9103-3665>

Rok Turniški

Univerza v Ljubljani, Biotehniška fakulteta, Jamnikarjeva 101, SI – 1000 Ljubljana
rok.turniski@bf.uni-lj.si, <https://orcid.org/0000-0002-0630-6620>

dr. Helena Grčman

Univerza v Ljubljani, Biotehniška fakulteta, Jamnikarjeva 101, SI – 1000 Ljubljana
helena.grcman@bf.uni-lj.si, <https://orcid.org/0000-0003-0724-9151>

DOI: <https://doi.org/10.3986/GV94205>

UDK: 631.4:502/504

COBISS: 1.02

IZVLEČEK

Od kakovosti tal do ekosistemskih storitev tal

Kakovost tal lahko definiramo kot kontinuirano sposobnost tal za zagotavljanje ekosistemskih storitev (ES). Znanost o tleh prepozna pet glavnih funkcij tal, ki zagotavljajo ES: (i) primarna produkcija, (ii) čiščenje in uravnavanje vode, (iii) skladiščenje ogljika in uravnavanje podnebja, (iv) biotska pestrost in zagotavljanje habitatov ter (v) zagotavljanje in kroženje hranil. ES ocenjujemo po naslednjih pristopih: (i) na podlagi kazalnikov, pri katerih ocene ES tal temeljijo na poenostavljenih približkih izbranih lastnosti tal; (ii) na empiričnih povezavah med lastnostmi tal in funkcijami tal (statični pristop) in (iii) na podlagi modeliranja talnih procesov v času (dinamični pristop). Število modelov in orodij za ocenjevanje ES tal narašča, vendar pa je vprašljivo, v kolikšni meri se ocene približajo realni porazdelitvi in zastopnosti posamezne ES v prostoru. Nujni so kakovostni vhodni podatki o tleh, izbor robustnih kazalnikov kakovosti tal za ocenjevanje ES in nadaljnji razvoj modelov ter orodij za ocenjevanje funkcij tal in ES v smeri zmanjševanja negotovosti. Slovenija šele postavlja koncept ES tal, zato je namen prispevka na osnovi pregleda literature osvetliti razvoj konceptov in pristopov njihovega ocenjevanja v mednarodnem prostoru.

KLJUČNE BESEDE

naravni kapital, ekosistemske storitve, upravljanje z naravnimi viri, kazalniki kakovosti tal, funkcije tal, modeliranje

ABSTRACT***From soil quality to soil ecosystem services***

Soil quality is defined as the continued capacity of soils to provide ecosystem services (ES). Soil science identifies five main soil functions that provide ES: (i) primary production, (ii) water purification and regulation, (iii) carbon sequestration and climate regulation, (iv) biodiversity and habitat provision, and (v) provisioning and nutrient cycling. Three categories of ES assessments can be distinguished: (i) indicator approaches that use simplified approximations based on key soil properties as indicators, (ii) static approaches that apply empirical relationships to link soil properties to soil functions, and (iii) dynamic approaches that apply biophysical methods to integrate soil, climate, and environmental factors to model soil processes over time. Many decision-support tools have emerged, but the extent to which estimates of ES approximate the actual distribution and representation of each ES in space is questionable. High-quality soil input data, selection of robust soil quality indicators for ES assessment, and further development of models and tools for assessing soil functions and ES to reduce uncertainty are essential. Slovenia is in the process of establishing the concept of soil ES. Therefore, based on a literature review, this paper aims to show the development of concepts and approaches for ES assessment at the international level.

KEY WORDS

natural capital, ecosystem services, natural resource management, soil quality indicators, soil functions, modelling

Uredništvo je prispevek prejelo 26. aprila 2022.

1 Uvod

Tla zagotavljajo človeški družbi pridelavo zdrave hrane, kakovostne krme, vlaknin in druge biomase (MEA 2005). Če pogledamo širše, pa je vrednost tal še mnogo večja, saj njihove številne funkcije oziroma naravni procesi, ki potekajo v tleh, vzdržujejo življenje na Zemlji. Tla zadržujejo in čistijo vodo, uravnavajo pretoke in polnjenje vodonosnikov ter tako blažijo vplive poplav in suš, iz ozračja vežejo ogljik in prispevajo k zmanjševanju emisij toplogrednih plinov ter učinkov podnebnih sprememb, s kroženjem hranil omogočajo rodovitnost in zmanjšujejo onesnaženje, ohranjajo in varujejo biotsko raznovrstnost ter habitate v tleh in nad tlemi, ohranjajo kakovost pokrajine in našo kulturno dediščino. Večnamenskosti tal se zavemo posebno takrat, ko človek s svojimi dejavnostmi poslabša njihovo kakovost, posledično se poslabšajo za življenje bistvene funkcije tal in nadalje koristi za ljudi oziroma ekosistemske storitve (v nadaljevanju ES).

Tla, ki so v našem življenju pomemben neobnovljiv vir, so že ogrožena po vsej Evropi in po svetu. Stroški, povezani z degradacijo tal, v Evropski uniji presegajo 50 milijard evrov letno (European Commission 2022). Degradacija tal lahko vodi do uničenja krajine in ekosistemov, zaradi česar so družbe ranljiveše pred ekstremnimi vremenskimi dogodki, prehransko negotovostjo in onesnaženjem ter političnimi nestabilnostmi. V Evropi glavno grožnjo za tla predstavlja pozidava, ki jo uvrščamo med nepovratno degradacijo tal. Resnost problema in nujnost ukrepanja kažeta naslednja podatka: v Evropi zaradi pozidave izgubimo 500 km² zemljišč letno (EASAC 2018), v obdobju 2000–2018 pa so se umetne površine, ki vključujejo pozidana in prekrita zemljišča ter odlagališča odpadkov, povečala kar za 7,1 % (European Environment ... 2019). S širjenjem mest in naraščanjem deleža ljudi v mestih se stik ljudi s tlemi zmanjšuje, vendar pa je v zadnjem obdobju zaznati povečanje zavedanja o pomenu tal, kar lahko prispeva k upočasnitvi njihovega izgubljanja v prihodnosti (Dazzi and Lo Papa 2022).

Ocenjevanje koristi, ki jih ljudje prejemamo od ekosistemov, t. i. ocenjevanje ES, se uveljavlja kot eno ključnih orodij za presojo trajnosti rabe naravnih virov, ki bi ga lahko uporabili za izboljšanje upravljanja z naravnimi viri, tako na nacionalni ravni kot ravni Evropske unije. Vendar pa je metodologija ocenjevanja ES še v razvoju in do celovite uporabe koncepta čaka še veliko izzivov.

Na primer, povezave med kakovostjo tal in ES tal so zaradi kompleksnosti talnega ekosistema in številnih interakcij zelo zahtevne, zato ne preseneča veliko število raziskav in pobud, ki trenutno potekajo v evropskem prostoru. Potrebna je harmonizacija tako monitoringov kakovosti tal kot tudi ocenjevanja ES. Trenutno nacionalne podatke monitoringov kazalnikov kakovosti tal za poskuse ocen ES uporablja le nekaj evropskih držav, pa še te le za omejeno število ES: Nizozemska (Rutgers s sodelavci 2008; 2012), Italija (Calzolari s sodelavci 2016), Francija (Ellili-Bargaoui s sodelavci 2021) ter Švica (Drobnik s sodelavci 2018). Ne le, da se pristopi ocenjevanja ES med državami razlikujejo, tudi definiranje in razumevanje pojmov, kot so kakovost tal, funkcije tal in ekosistemske storitve, je različno tako med odločevalci kot tudi med strokovno javnostjo. Ker je Slovenija še na začetku razvojne poti pri postavljanju koncepta ES (Šmid Hribar, Japelj in Vurunič 2021; Faber s sodelavci 2022), je namen prispevka na podlagi pregleda literature osvetliti izhodišča prepoznavanja in vrednotenja ES in pregled pristopov njihovega ocenjevanja v evropskem prostoru. Čeprav Slovenija še nima vpeljanih orodij za vrednotenje ES, pa dobre prakse celostnega ravnanja s tlemi, ki pomembno prispevajo k ohranjanju in kakovosti tega pomembnega naravnega vira, že poznamo.

2 Metodologija

Raziskava se je osredotočila na pregled obstoječe literature, ki je zajemala znanstvene objave v bazah *Web of Science* (WoS) in *Scopus* ter projektov in programov Evropske unije s področja kakovosti tal in ES. Posebno pozornost smo namenili študijam, ki so ES tal ocenjevale na podlagi merjenih podatkov lastnosti tal in/ali ekspertnih ocen kakovosti tal.

3 Kakovost tal

Kakovost tal je opredeljena kot sposobnost tal, da delujejo kot vitalni, živi sistem znotraj meja ekosistema in rabe zemljišč, da vzdržujejo produktivnost rastlin in živali, ohranjajo ali izboljšujejo kakovost vode in zraka ter podpirajo zdravje rastlin in živali (Doran in Parkin 1994; 1996). Kakovost tal lahko opredelimo tudi kot kontinuirano sposobnost tal za zagotavljanje ES. Delovanje tal, ki ga lahko spremeljamo skozi različne funkcije tal, kot tudi kakovost tal, sta neposredno odvisna od lastnosti tal in njihove dinamike, na katero vplivata podnebje in gospodarjenje s tlemi.

Od zgodnjih devetdesetih let prejšnjega stoletja je koncept kakovosti tal deležen precejšnje pozornosti (Doran in Parkin 1994; Bünneman s sodelavci 2018). Najprej so bili vloženi veliki naporji za opredelitev kakovosti tal, nato pa za preoblikovanje tega nejasnega koncepta v nekaj oprijemljivega. Določitev kakovosti tal je namreč zaradi kompleksnosti talnega ekosistema (tj. strukturiranosti naravne matrice tal, pestrosti v sestavi mineralne in organske komponente tal, medsebojne prepletenosti procesov in številnih biotskih interakcij) zelo zahtevna (Suhadolc 2013).

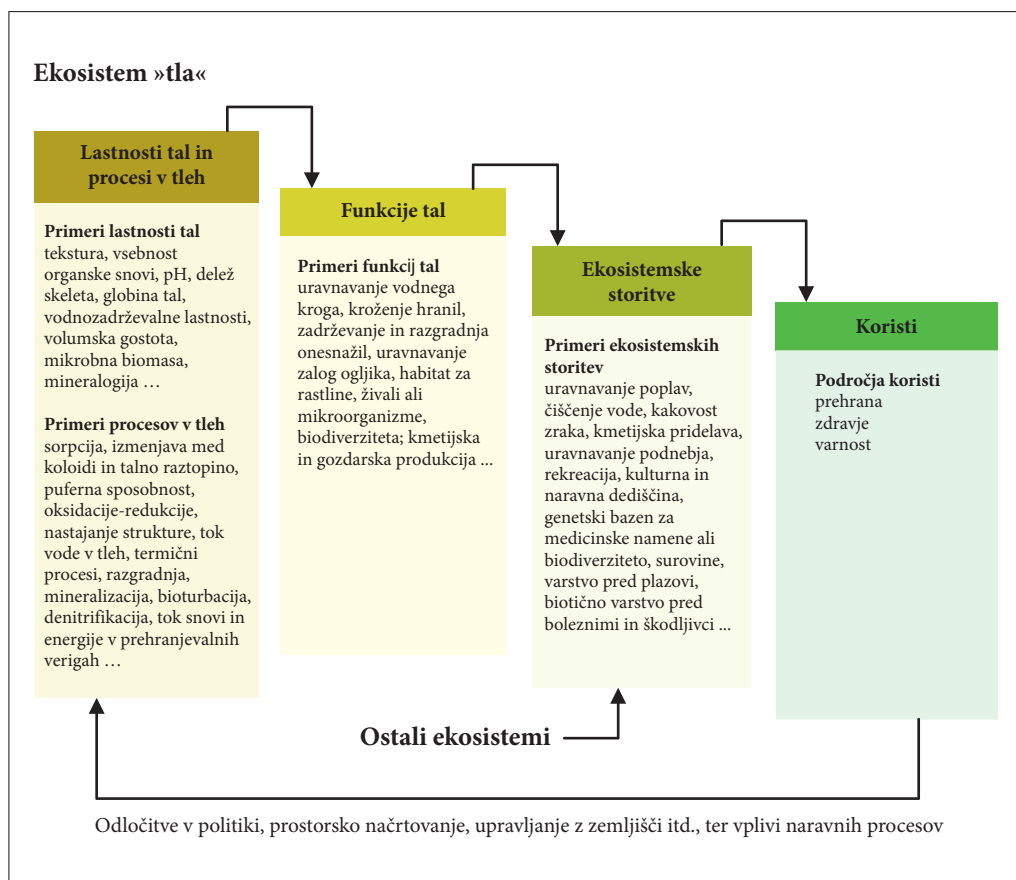
Kakovost tal ocenjujemo z določanjem lastnosti tal (t. i. kazalniki kakovosti). Zaželeno je uporaba vseh treh komponent kakovosti, tj. fizikalnih, kemijskih in bioloških lastnosti tal (slika 1) (Suhadolc

FIZIKALNI KAZALNIKI	KEMIJSKI KAZALNIKI	BIOTSKI KAZALNIKI
<ul style="list-style-type: none"> • struktura in obstojnost agregatov • volumska gostota • poroznost • globina korenin • mehanska upornost - zbitost tal • skelet (delež in velikost) • infiltracija vode • sposobnost zadrževanja vode (poljska kapaciteta) • hidravlična prevodnost • tekstura • globina tal 	<ul style="list-style-type: none"> • vsebnost organske snovi • založenost s hranili in dostopnost • C/N razmerje • pH • kationska izmenjalna kapaciteta in delež baz • vsebnost onesažil (anorganskih in organskih) ter njihova dostopnost • karbonati • električna prevodnost • slanost 	<ul style="list-style-type: none"> • biomasa <ul style="list-style-type: none"> • mikrobna biomasa • biomasa talnih živali (deževnikov) • vegetacija (pridelek) • številčnost <ul style="list-style-type: none"> • bakterij/arhej/gliv • deževnikov in druge favne • pestrost <ul style="list-style-type: none"> • mikrobna pestrost • pestrost deževnikov in druge favne • vrstna (taksonomska) proti funkcionalna (ključni geni procesov ...) • aktivnost <ul style="list-style-type: none"> • dihanje (respiracija) • encimska aktivnost • hitrost razgradnje organske snovi • potencialna mineralizacija N, nitrifikacija, denitrifikacija

Slika 1: Kazalniki kakovosti tal (prirejeno po Suhadolc 2013).

2013; Bünneman s sodelavci 2018). Kljub temu se največkrat uporabljajo le izbrani fizikalno-kemijski kazalniki in to zaradi preprostega dejstva, da se določajo kot tudi interpretirajo lažje od biotskih. Prednost fizikalno-kemijskih lastnosti tal je lahko tudi njihova manjša spremenljivost (prostorska in časovna znotraj ene lokacije) v primerjavi z biotskimi, ki se lahko kot posledica relativno majhnih okoljskih nihanj spreminjajo tudi za več velikostnih razredov (na primer temperature ali vsebnosti vode v tleh). Vendar je prav večja občutljivost in hitrejša odzivnost biotskih kazalnikov (posebno mikroorganizmov), na spremembe v okolju lahko njihova pomembna prednost, saj morebitno poslabšanje kakovosti tal lahko prej zaznamo in tudi širše ovrednotimo.

Medtem ko je nabor fizikalno-kemijskih kazalnikov relativno konstanten in jasen, pa je z izborom biotskih kazalnikov zaradi njihovega širokega nabora, različnih metod istega kazalnika, pomanjkanja standardiziranih metod, referenčnih materialov in standardov ter finančne in izvedbene zahtevnosti bistveno več dilem (Griffiths s sodelavci 2016). Pri biotskih kazalnikih pogosto tudi ne poznamo referenčnih vrednosti, tj. kaj je dobro oziroma slabo stanje, kazalnik pa je uporaben le, če je njegovo vrednost mogoče nedvoumno razložiti. Za ocenjevanje kakovosti tal se lahko uporabljajo tudi t. i. indeksi kakovosti tal (na primer Bastida s sodelavci 2008), ki pa so za ocenjevanje ES manj primerni, saj se informacija o posameznih funkcijah tal izgubi.



Slika 2: Ocena prispevkov funkcij tal k ES z uporabo kaskadnega okvira (prirejeno po Haines-Young, Potschin in Chesire 2006; Greiner s sodelavci 2017).

Kakovost tal lahko spremljamo tudi z merjenjem različnih procesov, na primer hitrost razgradnje organskih ostankov. Talni procesi so namreč rezultat interakcij med fizikalnimi, kemijskimi in biološkimi lastnostmi tal, ki podpirajo funkcije tal in z njimi povezane ES. Prav razvoj koncepta kakovosti tal, ki temelji na funkcijah tal, je pomembno prispeval k razumevanju prispevka tal k ES in pomenu tal za dobro počutje ljudi (slika 2). Funkcije tal lahko opredelimo kot svežnje talnih procesov, ki podpirajo ES (Glenk, McVittie in Moran 2012; Haines-Young in Potschin 2018).

4 Ekosistemske storitve tal

Ekosistemske storitve so številne koristi za ljudi, ki jih zagotavljajo ekosistemi (MEA 2005). Razvoj opredelitev ES sega že v 19. stoletje (na primer George Perkins Marsh, avtor knjige *Man and Nature* iz leta 1864) in celo dlje (Platon), ko so ljudje že razumeli, da naravni ekosistemi podpirajo družbo (Mooney in Ehrlich 1997). Opredelitev konceptov ter prepoznavanje in razvrščanje ekosistemskih storitev, pa se je pričelo razvijati šele v sedemdesetih letih 20. stoletja, bolj prepoznavno je postalo v naslednjih desetletjih, predvsem z znanstvenimi objavami Costanza s sodelavci (1997a; 1997b) in Daily (1997). Velik premik se je zgodil s poročilom *Milenijska ocena ekosistemov* (MEA 2005), ki je koncept ES utrdil in populariziral (Baveye, Baveye in Gowdy 2016). Gre za antropocentričen pogled, saj so ES po MEA (2005) namreč »koristi, ki jih ima človeška družba od ekosistemov«. MEA razvršča ES v štiri kategorije: (i) oskrbovalne (neposredna ali posredna hrana za ljudi, pitna voda, les, vlaknine in energija), (ii) uravnavalne (uravnavanje plinov in vode, podnebja, poplav, erozije, bioloških procesov, kot so oprashevanje in bolezn), (iii) kulturne (estetske, duhovne, izobraževalne in rekreacijske) in (iv) podporne (kroženje hranil, produkcija, življenjski prostor, biodiverzitet). Prve tri kategorije ES neposredno vplivajo na družbo, medtem ko podporne omogočajo vzdrževanje drugih ES. Podporne ES se od ostalih ločijo po tem, da so vplivi na družbo najpogosteje posredni ali se zgodijo v daljšem časovnem okviru (na primer nastajanje tal, primarna produkcija, kroženje vode in hranil).

Z uveljavitvijo koncepta ES v znanosti in politiki so se po MEA (2005) vrstile nove pobude. Med pomembnejšimi sta TEEB – *The Economics of Ecosystems and Biodiversity* (2010) in CICES – *The Common International Classification of Ecosystem Services* (Haines-Young in Potschin 2018). Posebnost TEEB oziroma Ekonomije ekosistemov in biotske pestrosti je, da skupino podpornih ES zamenjujejo habitatne storitve. CICES pa je rezultat okoljskega računovodstva, ki ga že od leta 2009 razvija Evropska agencija za okolje (EEA). CICES ekosistemske storitve uvršča v tri kategorije: (i) oskrbovalne, (ii) uravnavalne/ohranjevalne in (iii) kulturne. Temelji na hierarhični strukturi z različnimi ravnmi, od splošnih do bolj specifičnih kategorij. Sistem CICES se zdi bolj privlačen za razvrščanje ES, vendar bi ga bilo treba nadgraditi, da bi postal bolj vključujoč za tla. CICES 5.1 na primer opredeljuje 83 razredov ES, od katerih jih je le 29 povezanih s tlemi, in 40 razredov, na katere vpliva kmetijstvo z gospodarjenjem s tlemi (Paul s sodelavci 2020).

Kljub temu, da so tla in njihovo delovanje bistven element za zagotavljanje številnih ES, so pri nastajanju različnih okvirjev evidentiranja in vrednotenja ES ves čas ostajala precej zapostavljena (Baveye, Baveye in Gowdy 2016). ES tal so se začele osvetljevati šele po letu 2009 (Robinson, Lebron in Vereecken 2009; Bennett s sodelavci 2010; Dominati, Patterson in Mackay 2010; Robinson in Lebron 2010; Martins in Angers 2015). Med najbolj citiranimi je članek Dominati, Patterson in Mackay (2010), ki je opredelil oskrbovalne, uravnavalne in kulturne ES tal ter jih opredelil kot koristne tokove, ki izhajajo iz zaloga naravnega kapitala tal (preglednica 1). V preglednici 1 povzemamo glavni tokove, tj. oskrbovalne in uravnavalne ES. Skupino kulturnih ES smo v preglednici izpustili, saj je o njih zelo malo raziskav, kar pa ne pomeni, da tovrstne ES niso pomembne. V mnogih kulturah so tla vir estetske izkušnje, duhovne obogatitve in rekreacije. Številna božanstva in verska prepričanja se nanašajo posebej na zemljo (tla) in njeno svetost. Tla imajo tudi različne kulturne namene, so kraj za pokop mrtvih, vir materiala za gradnjo hiš ali prostor za shranjevanje in kuhanje hrane (Dominati, Patterson in Mackay 2010). Razširjen

Preglednica 1: Oskrbovalne in uravalne ES tal (prirejeno po Dominati, Patterson in Mackay 2010).

Oskrbovalne ES so opredeljene kot »proizvodi, pridobljeni iz ekosistemov« (MEA 2005).

preskrba s hrano, lesom in vlakninami	Ljudje uporabljajo različne rastline za različne namene (hrana, gradbeništvo, energija, vlaknine, zdravila). Tla omogočajo rast rastlinam, jih fizično podpirajo in jih oskrbujejo s hranili in vodo. Zaloge naravnega kapitala, ki zagotavljajo opravljanje ES, so struktura tal, sposobnost zadrževanja vode in sposobnost zadrževanja hranil.
zagotavljanje fizične podpore	Tla tvorijo Zemljino površino in predstavljajo fizično osnovo, na kateri živijo živali in ljudje ter stoji infrastruktura. Tudi sicer slabo rodovitna tla lahko zagotavljajo fizično podporo človeški infrastrukturi. Tla zagotavljajo tudi podporo živalskim vrstam, ki koristijo ljudem (na primer divjad, živina). Zaloga naravnega kapitala za to storitev so strukturirana tla z dobro obstojnimi strukturnimi agregati.
oskrba s surovinami	Tla so lahko vir surovin, na primer šote za gorivo in gline za lončarstvo ali gradbeništvo. Te zaloge materiala so vir ES. V tem primeru s stališča hitrosti obnavljanja smatramo tla kot neobnovljiv vir.

Uravalne ES omogočajo življenje v stabilnem, zdravem in odpornem okolju. Uravnavanje, ki ga zagotavljajo te ES, izhaja iz procesov v tleh in vpliva na vzpostavitev ravnovesja med naravnimi zalogami kapitala.

blažitev poplav	Tla lahko shranijo in zadržijo določeno količino vode, zato lahko ublažijo in zmanjšajo vplive ekstremnih podnebnih razmer in omejijo poplave. Na storitev imajo velik vpliv struktura tal, predvsem makroporoznost, ter procesi, kot so infiltracija in drenaža.
kroženje in zadrževanje hranil	Če se vodotopne snovi v tleh (na primer nitrati, fosfati) izpirajo v podtalje, lahko postanejo onesnaževalec vodnih ekosistemov (na primer evtrofikacija) in nevarnost za zdravje ljudi (na primer nitrat v pitni vodi). Tla imajo sposobnost adsorpcije in zadrževanja snovi, s čimer preprečujejo njihovo izpiranje iz tal. Na storitev vpliva vsebnost gline in organske snovi v tleh ter proces adsorpcije in padavine. Storitve ima pomemben vpliv na kakovost odtočnih voda ter s tem na vodna telesa, kot so podtalnica, jezera in reke.
biotično uravnavanje rastlinskih škodljivcev in boleznih	Z zagotavljanjem habitata koristnim vrstam lahko tla podpirajo rast rastlin (fiksatorji N, mikoriza) ter nadzorujejo širjenje škodljivcev (rastlin, živali ali človeških škodljivcev) in prenašalcev škodljivih boleznih (na primer virusov, bakterij). Razmere v tleh (na primer vsebnost vode, temperatura) določajo kakovost talnega habitata in s tem vrsto prisotnih organizmov. Storitve je odvisna od lastnosti tal in bioloških procesov, ki spodbujajo med- in znotraj-vrstne specifične interakcije (simbioza, konkurenca).
recikliranje odpadkov in samoočiščevalna sposobnost	Tla se lahko samoočiščujejo in reciklirajo odpadke. Organizmi v tleh razgrajujejo odmrlo organsko snov v preprostejše oblike, ki jih organizmi lahko ponovno uporabijo. Tla lahko adsorbirajo (fizikalno in fizikalno-kemijsko) in/ali razgradijo kemijske snovi, ki so lahko škodljive za ljudi ali organizme, koristne človeku. Ta storitev je odvisna od bioloških procesov, kot sta mineralizacija ter imobilizacija, in je zato povezana tudi z naravnimi zalogami hranil, ki so na voljo za talne organizme ali za kemijske reakcije v tleh.
shranjevanje ogljika in uravnavanje emisij N ₂ O in CH ₄	Tla igrajo pomembno vlogo pri uravnavanju številnih atmosferskih plinov, kar vpliva na kakovost zraka. Morda je najpomembnejša sposobnost tal ta, da shranjujejo ogljik kot stabilno organsko snov. Ta storitev temelji predvsem na zalogah talne organske snovi in procesih, ki jih zagotavljajo. Odvisna je tudi od razmer v tleh (na primer vsebnost vode in temperatura), ki uravnavajo dejavnost organizmov v njih in s tem sproščanje toplogrednih plinov, kot sta dušikov oksid (N ₂ O) in metan (CH ₄).

seznam kulturnih ES podaja Motiejūnaitė s sodelavci (2019): duhovna in religiozna vrednost, sistem znanja, izobraževalna vrednost, inspiracija, doživetje prostora, estetična vrednost, dediščina, družbeni odnosi, rekreacija in ekoturizem ter zdravje in blaginja. Kot ključne pri zagotavljanju storitev Dominati, Patterson in Mackay (2010) obravnavajo tudi podporne procese, kot so kroženje hranil, kroženje vode in biotsko aktivnost v tleh. Povzamemo lahko, da so tla naravni kapital, ki s svojim delovanjem omogočajo pretok naravnih virov oziroma podpirajo ES (Dominati, Patterson in Mackay 2010). Ocenjujemo ga na podlagi izbranih fizikalnih, kemijskih in bioloških lastnosti tal, ki omogočajo procese v tleh in nanje tudi vplivajo. Nekatere od lastnosti so relativno stabilne, medtem ko so druge dinamične in se lahko močno spreminjajo pod vplivom podnebja in kmetijskih praks.

4.1 Povezave med kakovostjo in funkcijami tal ter ekosistemskimi storitvami

ES so le počasi prodirale na področje znanosti o tleh; predvsem skozi koncept kakovosti in delovanja tal (tj. funkcij tal). Ker se termin »funkcija« lahko uporablja različno, kot sopomenka za: 1) proces, 2) delovanje, 3) vlogo in 4) storitev (Glenk, McVittie in Moran 2012; Baveye, Baveye in Gowdy 2016), je Schwilch s sodelavci (2016) odsvetoval uporabo tega izraza za ES. Ker pa znanost o tleh izraz »funkcija tal« v ožjem in natančno določenem kontekstu uporablja že več kot 50 let ter je služil tudi kot konceptualna podlaga za precejšen obseg raziskav in pomembnega dela oblikovanja politik, kot je na primer *Tematska strategija o tleh Evropske komisije* (European Commission 2006), se je terminologija »funkcije in storitve« ohranila. Opredelitev funkcije tal in določitev njenih meja pa nista lahki, poleg tega pogosto prihaja do zamenjave obeh izrazov. Funkcije tal se nanašajo na naravne biološke procese, medtem ko se ES nanašajo na tiste funkcije, ki prispevajo k blaginji človeka. Funkcije tal, ki zagotavljajo ES, praviloma opisujemo s »tokovi in preobrazbami mase, energije in genetskih informacij« (Banwart s sodelavci 2019).

Znanost o tleh prepozna pet glavnih funkcij tal, ki zagotavljajo ES: (i) primarna produkcija, (ii) čiščenje in uravnavanje vode, (iii) skladiščenje ogljika in uravnavanje podnebja, (iv) biotska pestrost in zagotavljanje habitatov ter (v) zagotavljanje in kroženje hranil (Rutgers s sodelavci 2012; Bouma 2014; Schulte s sodelavci 2014). V tleh vse omenjene funkcije potekajo sočasno, vendar pa sta obseg in relativni delež posamezne funkcije odvisna od številnih dejavnikov: (i) lastnosti tal (fizikalnih, kemijskih in bioloških), (ii) okoljskih spremenljivk (temperaturni in padavinski režim, hidrologija, naklon), (iii) rabe zemljišč (obdelovalna zemljišča, travinje, gozd) in (iv) gospodarjenja s tlemi (na primer drenaža in namakanje, obdelava tal, gnojenje, varstvo rastlin, izbira kulture in kolobarjenje) (Schulte s sodelavci 2014; Vogel s sodelavci 2019).

Novejša literatura potrjuje, da so tla kot središče ekosistemov bistvenega pomena pri zagotavljanju ES in so številne ES povezane s tlemi (Adhikari in Hartemink 2016; Keesstra s sodelavci 2016; Greiner s sodelavci 2017; Pereira s sodelavci 2018; Paul s sodelavci 2020), vendar pa je hkrati treba priznati, da je zagotavljanje ES tal odvisno od delovanja celotnega ekosistema in ne le tal (Bouma 2014).

5 Pristopi ocenjevanja ES tal

Predpogoj za operacionalizacijo ocenjevanja ES tal je razpoložljivost metod in podatkov. Dejstvo je, da še ni splošno sprejete metodologije, primerne za ocenjevanje posameznih ES tal, zato so potrebne nadaljnje raziskave.

Trenutno ocenjevanje ES tal izhaja iz dveh smeri oziroma konceptualnih pristopov:

- (i) Koncept »od spodaj navzgor«, ki ga poganjata znanost o tleh in ekologija tal, s poudarkom na ocenjevanju neposrednih funkcij vzdrževanja življenja v tleh. Pri tem konceptu so tipi tal (lastnosti vezane na enoto talnega profila) osnova za ocenjevanje različnih funkcij. Torej na osnovi talnih lastnosti oziroma kazalnikov kakovosti tal sklepamo na funkcije in ES tal. Ta pristop so na izbranih kmetijah

uporabili Rutgers s sodelavci (2008; 2012). Najnovejši pomemben prispevek k razvoju koncepta od spodaj navzgor je projekt Evropske unije LANDMARK (na primer Debeljak s sodelavci 2019; Sandén s sodelavci 2019; Wall s sodelavci 2020), rezultat katerega je obsežen znanstveno zasnovan okvir za razumevanje in kvantificiranje funkcij tal. Vendar je za uveljavitev tega pristopa težava pomanjkanje vhodnih podatkov tako prostorsko kot časovno.

- (ii) Koncept »od zgoraj navzdol« v bolj celostnem ekosistemskem pristupu pa večinoma poganjata sistem-ska ekologija in okoljsko gospodarstvo. Ta pristop se v splošnem uporablja za potrebe politik, posebno kadar se ugotovi vrzel med tem, kar se trenutno meri v shemah ocenjevanja tal in tistim, kar bi bilo treba z vidika potencialne spremembe izmeriti za oceno določene funkcije, tj. bodisi izgube (degradacije) bodisi izboljšanja funkcije, na katere lahko vplivamo z gospodarjenjem. Primer pristopa od zgoraj navzdol je ocena biotske raznovrstnosti in okoljskih vplivov v širšem obsegu (ekosistemi, pokrajine), ki se uporablja v projektu MAES (2018). Težava v trenutnih pristopih »od zgoraj navzdol« je preveliko poenostavljanje in s tem velika negotovost v ocenah.

Metode ocenjevanja ES tal po pristopu lahko nadalje razdelimo še v tri skupine: i) na podlagi kazalnikov, pri katerih ocene ES tal temeljijo na poenostavljenih približkih izbranih lastnosti tal, ii) na empiričnih povezavah med lastnostmi tal in funkcijami tal (statični pristop) ter iii) na podlagi modeliranja talnih procesov v času z upoštevanjem tal, podnebja in okoljskih parametrov (dinamični pristop). Poudariti je treba, da vsi trije omenjeni pristopi vključujejo podatke o lastnostih tal, ki pa so lahko pridobljeni na različne načine: neposredno s terenskim delom, z ekstrakcijo iz pedoloških kart ali posredno z uporabo pedotransfernih funkcij na določenem območju. Metode za ocenjevanje funkcij tal, ki jih je razvila znanost o tleh in temeljijo na prostorskih eksplicitnih podatkih, bi lahko bile podlaga tudi za ocenjevanje ES tal.

ES tal se lahko vrednoti na ravni polja, kmetije, regije ali države, vendar ker se pojavljajo sočasno v prostoru in se prekrivajo ter medsebojno delujejo na različnih prostorskih in časovnih ravneh, je treba poznati njihovo prostorsko porazdelitev, predvsem pa tudi njihove prostorske sinergije in kompromise (Aryal, Maraseni in Apan 2022). Kompromisna situacija (*trade off*) je negativno razmerje med različnimi ES, tj. ko povečanje ene ES vodi do zmanjšanja drugih ES in obratno. Pridelava hrane na primer predstavlja največje kompromise z drugimi ES. Kompromisi ES se lahko pojavljajo tako prostorsko kot časovno. Prav razumevanje kompromisov je ključnega pomena za prostorsko načrtovanje in upravljanje ekosistemov.

5.1 Orodja za ocenjevanje ES tal

V zadnjem desetletju se je pojavilo veliko orodij in modelov za podporo odločanju, ki zapolnjujejo vrzeli med teoretičnimi koncepti, kakovostjo tal in oceno ES ter njihovo praktično uporabo pri odločanju (pregled v Bagstad s sodelavci 2018; Grêt-Regamey s sodelavci 2017; Rodrigues s sodelavci 2021). Vendar pa je zanesljivost rezultatov dosedanjega ocenjevanja ES predmet številnih razprav. Bistveno vprašanje, na katerega je treba odgovoriti, je, v kolikšni meri se ocene ES približajo realni porazdelitvi in zastopanosti ES v prostoru. Zanesljivost ocene ES je namreč bistvenega pomena, ko želimo te ocene uporabiti za dejansko zasnovano instrumenta politik (na primer prostorsko načrtovanje ali plačilne sheme ES) in ne le za ozaveščanje o ES.

Eden glavnih virov negotovosti večine orodij je, da je komponenta tal pogosto popolnoma prezrta (Baveye, Baveye in Gowdy 2016). V najboljših primerih so tla le površno zastopana, na primer z uporabo podatkov o pokrovnosti in/ali rabi tal ali z uporabo povprečij fizikalnih, kemijskih ali bioloških lastnosti kot poenostavljenih približkov za ES tal (Rutgers s sodelavci 2012; van Wijnen s sodelavci 2012; Hewitt s sodelavci 2015). Takšni pristopi so smiselni za ES, ki niso povezani s tlemi (na primer storitev oprashaevanja), a žal niso primerni za številne ES, ki so močno povezani s procesi in lastnostmi tal. Različna tla pod isto rabo zemljišč namreč lahko kažejo precejšnje razlike v ES in ekonomskih vrednostih. Integracija bolj realističnega prikaza raznolikosti tal, njihove kompleksnosti ter prostorske horizontalne in vertikalne heterogenosti je nujna za zmanjšanje negotovosti v oceni ES.

Eden večjih izzivov je tudi kvantifikacija ES tal. Izpostaviti moramo, da se kazalniki kakovosti tal in kazalniki ES morda zdijo podobni, vendar se pogosto nanašajo na različne količine. Kazalnik kakovosti tal je na primer zaloga organske snovi v tleh, ki se izraža v deležu (%; lahko tudi v t C/ha), za ES pa je kazalnik sprememba oziroma neto kopičenje C v tleh, ki ga izražamo kot neto tok C v tla (t C/ha/leto) (Dominati s sodelavci 2014b). Izračun toka C v tla pa je seveda veliko večji izziv (vezava C v tla proti emisijam CO₂) od meritev vsebnosti C v tleh in izračun zalog C. Študije kvantitativne ocene ES tal za potrebe ekonomskega vrednotenja večinoma temeljijo na modeliranih podatkih (Dominati s sodelavci 2014a; 2014b; Jónsson, Davíðsdóttir in Nikolaidis 2017; Schon in Dominati 2020). V literaturi je že veliko modelov za matematično opisovanje talnih procesov, ki so osnova za zagotavljanje ES, kot na primer za produkcijo biomase, uravnavanje kakovosti vode, blaženje erozije tal. Vendar se je treba zavedati prostorske in časovne heterogenosti tal ter posledičnih negotovosti tako v modelih kot v podatkih. Raziskovalci, ki se ukvarjajo s tlemi, lahko zagotovijo primerne vhodne podatke (kazalnike kakovosti tal) tako za preproste kot tudi za bolj zahtevne matematične modele ocenjevanja talnih procesov, funkcij in nadalje ES. Ker vseh parametrov tal ni preprosto izmeriti, se za manjkajoče parametre pogosto uporabljajo matematične funkcije (t. i. pedotransferne funkcije), ki povezujejo lastnosti, ki se enostavno merijo z manj razpoložljivimi parametri. Vendar pa pedotransfernih funkcij ne moremo neposredno prenašati iz okolja, v katerem so bile razvite, v druga okolja. Pri postavljanju metodologije ocenjevanja ES tal je zato ključno, da rezultate modelov preverjamo z neposrednimi meritvami na polju ali vsaj z medsebojno primerjavo rezultatov različnih modelov, kar je pokazal Ellili-Bargaoui s sodelavci (2021). Ugotovljamo tudi, da je ocenjevanje ES tal s trenutno dostopnimi podatki, modeli in smernicami izjemno zahtevno.

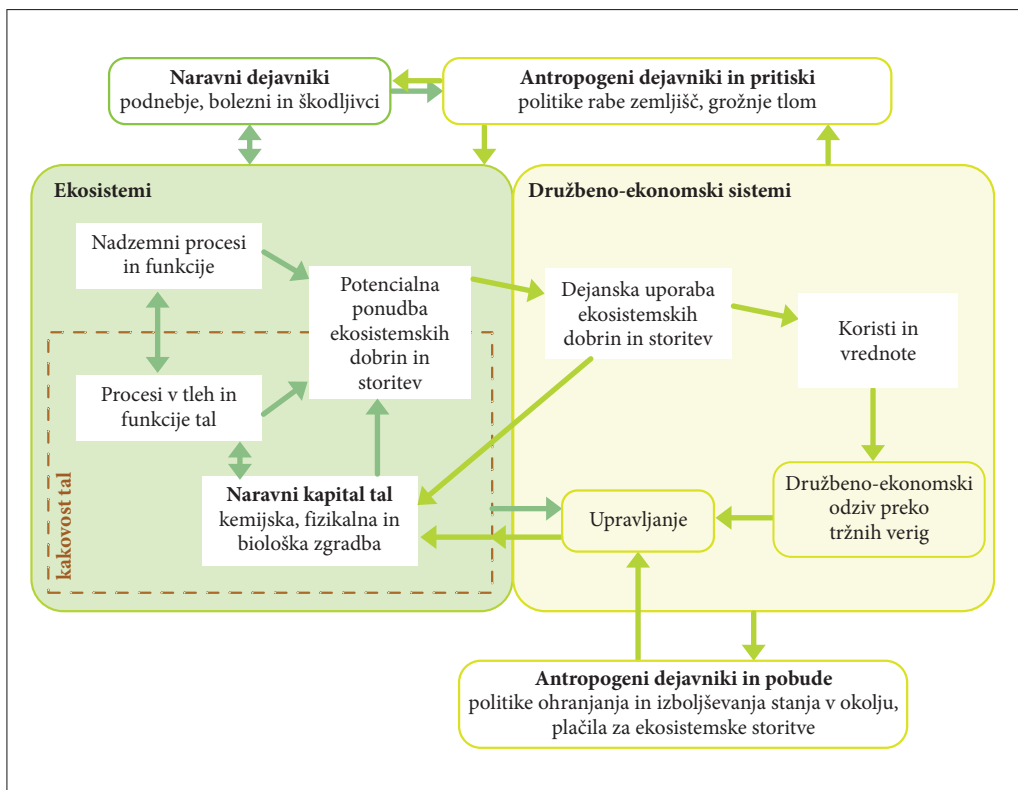
5.2 Izzivi pri uporabi kazalnikov kakovosti tal za ocenjevanje ES tal

Čeprav so od devetdesetih let 20. stoletja na voljo številna orodja za ocenjevanje in spremljanje kakovosti tal, se eksplicitna ocena kakovosti tal glede na posebne funkcije tal in ekosistemske storitve redko izvaja in dejstvo je, da le malo pristopov zagotavlja jasne razlage shem izmerjenih vrednosti kazalnikov (Bünemann s sodelavci 2018). Interpretacija vrednosti kazalnikov kakovosti tal kot tudi izbranih kazalnikov za ocenjevanje ES mora biti natančno opredeljena. Če ni nobenega sistema interpretacije, kazalnikov ni mogoče uporabiti v praksi.

Interpretacija kazalnikov kakovosti tal, tj. določitev ciljnih in/ali možnih razponov, je pogosto sporna zaradi več razlogov: deloma pomanjkanja podatkov, deloma nelinearnega vzorca porazdelitev številnih kazalnikov ter deloma zaradi uporabe strokovnih presoj, ki so same po sebi sporne (tj. subjektivne) (Merrington 2006). Primerjalni pristop, pri katerem se vrednosti ali ocene kazalnikov določenega vzorčevalnega mesta postavijo v razmerje do drugih vzorčevalnih mest, je lahko najbolj intuitivna in prilagodljiva podlaga za interpretiranje, saj daje relativno oceno (na primer zgornjih 25 %) ter omogoča nadaljnji razvoj sistema interpretacij. Nadalje je verjetno eden večjih izzivov razvoj na teksturo vezanih krivulj točkovanja, saj so številne lastnosti tal odvisne od teksture tal (Bünemann s sodelavci 2018).

Povečana razpoložljivost digitalnih pedoloških kart in podatkov o raziskavah tal, ki jo spodbujajo projekti Evropske unije, kot je na primer *LUCAS* (Medmrežje 1) in pobude, kot je na primer *COST CA18237* (2019), bo omogočala lažje določanje takšnih točkvalnih krivulj ali ciljnih vrednosti iz frekvenčnih porazdelitev določene lastnosti tal. Če je gospodarjenje s tlemi v regiji slabo ali je bilo takšno v preteklosti, frekvenčna porazdelitev podatkov določenega kazalnika ne bo vključevala optimalnega stanja in bo tako zavajala. V tem primeru bi bilo bolj primerno uporabiti načelo identifikacije referenčnih mest s priznano dobro kakovostjo tal (Rutgers s sodelavci 2008; 2012). Referenčne in/ali mejne vrednosti so potrebne, da se kazalniki kakovosti tal v celoti izkoristijo ter interpretacija pretvori v politike in v ustrezen nasvet glede upravljanja. Oceno (ne)skladnosti rezultatov, ki so pridobljeni na različne načine (na primer nizi kazalnikov, ki temeljijo na fizikalnih, kemijskih ali bioloških parametrih; glej na primer Velasquez, Lavelle in Andrade 2007), se lahko sprejme z matematičnimi postopki, razviti za ocenjevanje ekoloških tveganj (Karlen, Andrews in Doran 2001; Rutgers in Jensen 2011).

Za ocenjevanje ES tal so seveda pomembne baze podatkov iz nacionalnih monitoringov kakovosti tal. Pomembno je izpostaviti, da je spremljanje biotskih kazalnikov v nacionalnih monitoringih tal redko ter nezadostno za spremljanje stanja biotske raznovrstnosti (na primer bogastva vrst) in za oceno funkcionalnih vidikov pri zagotavljanju ES (Pulleman s sodelavci 2012; van Leeuwen s sodelavci 2017; Faber s sodelavci 2022). Pregled nacionalnih monitoringov držav članic Evropske unije je tudi pokazal, da nobena država članica še nima vzpostavljenega sistema za ocenjevanje vseh petih glavnih funkcij tal, v številnih državah pa ni na voljo nobenih podatkov o tleh za oceno večnamenskosti (van Leeuwen s sodelavci 2017; Faber s sodelavci 2022). Za uskladitev nacionalnih pristopov v podporo oceni ES na ravni Evropske unije sta izbira in razvoj minimalnega nabora podatkov, ki izhajata iz večjega sklopa kazalnikov, nujen korak (Duval s sodelavci 2016; Faber s sodelavci 2022). Zato ne presenečajo nedavne aktivnosti na ravni Evropske unije, kot sta na primer *Mission Soil Health and Food* (Medmrežje 2) in *EJP Soil Programme* (Medmrežje 3), ki bodo prispevale k izboru in razvoju konsistentnega nabora robustnih kazalnikov kakovosti tal, kot tudi razvoju povezav med kazalniki kakovosti tal in kazalniki ES. V okviru omenjenih pobud bodo tako obstoječi pristopi spremljanja stanja tal kot tudi predlogi dopolnitev in izboljšav ovrednoteni v smislu znanstvenih zahtev in ustreznosti za politike (glede rabe tal, groženj tlom in ES).



Slika 3: Konceptualni okvir SIREN, ki združuje ekološke (levo, zeleno) in družbeno-ekonomske (desno, rumeno) sisteme (prirejeno po Faber s sodelavci 2022). Koristi ekosistemov so lahko dobrine (na primer hrana, les, šota) ali storitve (na primer filtriranje vode, shranjevanje ogljika). Kvadratna polja predstavljajo merljive parametre, zaobljena pa mehanistične sile politik, upravljanja, tržnih verig ali naravnih dejavnikov.

Kot na podlagi nedavnega popisa sistemov spremljanja stanja v Evropski uniji z vidika ocenjevanja kakovosti tal in ES ugotavlja Faber s sodelavci (2022), je najprej treba poenotiti terminologijo, ki je pogosto med različnimi strokami, deležniki in državami različna ali celo nasprotujoča ter postaviti celovit konceptualni okvir za ocenjevanje ES, ki bi povezoval kazalnike kakovosti tal s funkcijami tal in ES. Faber s sodelavci (2022) je tudi predstavil predlog koncepta SIREN (slika 3), ki medsebojno povezuje »ekosistem« (naravni kapital) in »družbenoekonomski sistem«, kar je pomembna novost in dopolnitev predhodnih konceptov, ki so vključevali le posamezne sklope, na primer funkcije tal (Adhikari in Hartemink 2016), grožnje tlom (Schwilch s sodelavci 2016), tla kot naravni kapital (Robinson s sodelavci 2009), institucionalno ekonomijo (Bartkowski s sodelavci 2018), trajnostni razvoj (Keesstra s sodelavci 2016) in ocenjevanje trajnosti (Helming s sodelavci 2018).

Zagotavljanje ES tal ni odvisno le od talnih lastnosti (kazalnikov kakovosti tal), temveč od delovanja celotnega ekosistema (Bouma 2014). Pri izbiri kazalnikov morajo biti odločitvene sheme zato vezane tudi na okoljske razmere in sisteme gospodarjenja s tlemi ter pomembnost posameznih ES.

5.3 Pregled obstoječih študij ocenjevanja ekosistemskih storitev tal

Pregled literature, vezane na kazalnike kakovosti tal za ocenjevanje ES tal, je pokazal, da konkretnih študij ni veliko (Rutgers s sodelavci 2008; 2012; Calzolari s sodelavci 2016; Drobnik s sodelavci 2018; Lilburne s sodelavci 2020; Ellili-Bargaoui s sodelavci 2021). Ugotovili smo, da se študije ocenjevanja ES tal med seboj razlikujejo glede na vhodne podatke, velikost preučevanega območja ter analizo in interpretacijo podatkov. Zaradi pomanjkanja podatkov in ustreznih modelov za posamezne funkcije oziroma ES ter smernic ocenjevanja ES študije mnogokrat temeljijo na ekspertnem mnenju, ki je po definiciji subjektivno. Za potrebe modeliranja procesov/funkcij tal pri ocenjevanju ES tal večjih območij so podatki o tleh pogosto generalizirani oziroma ekstrapolirani iz omejenega števila meritev in/ali vzorčnih mest, kar dodatno vpliva na pristranskost takšnih študij. Ker je praktično nemogoče zajeti celotno časovno, prostorsko in podnebno heterogenost, ki ima lahko lokalno velik vpliv na prispevek k ES tal, raziskovalci sprejemajo kompromise. Pogosto se je treba odločiti, ali (i) želimo generalizirati modele na večja območja in s tem izgubiti določen del informacij na nižjih ravneh ali pa (ii) želimo uporabiti večje število informacij, zaradi katerih postane model za večja območja nepregleden in se zato osredotočimo na nižje ravni (na primer posamezne kmetije, polja). Modeli na ravni kmetije ali polja so v splošnem narejeni za točno določena območja (tj. kalibrirani in validirani) in imajo posledično omejeno uporabnost. Obenem je takšen model zaradi časovno prostorske variabilnosti, različnih rab tal, topografskih in podnebnih značilnosti skoraj nemogoče validirati, še manj pa uporabiti na drugem, netipičnem območju.

Ob pregledu literature lahko sklenemo, da večina dosedanjih ocen ES tal ne temelji na rezultatih raziskav (bodisi meritev bodisi modeliranja), ker pogosto le-teh ni, temveč temeljijo na predpostavkah oziroma strokovnih ocenah. Tovrstna ocenjevanja ES tal pa je treba jemati z zadržanostjo, saj končne ocene vsebujejo precejšnjo negotovost in so zato lahko zavajajoče.

6 Sklep

Družba na splošno, še zlasti pa politični odločevalci, si vse bolj želi(jo) znanstveno podprtih odločitev v korist trajnostnega razvoja (Bartkowski s sodelavci 2020). Za sintezo znanstvenih informacij v podporo politiki se uporablja pristop »ocenjevanja učinkov« (*impact assessment*), za katerega pa so potrebne standardizirane metode in kazalniki, kar je še posebej pomembno za tla, zaradi njihove zelo velike prostorske heterogenosti, raznolikega upravljanja s tlemi ter številnih ES, ki jih zagotavljajo.

Številni članki, ki so bili v zadnjem desetletju objavljeni na temo ES, dajejo vtis, da za splošne ES, vključno z nekaterimi, neposredno povezanimi s tlemi, vrednotenje ne predstavlja posebne težave. A če se v omenjene študije poglobimo, ugotovimo številne pomanjkljivosti. Za ocenjevanje ES so pogosto

uporabljene javno dostopne statistike, pridobljene na veliko večjih prostorskih enotah, kot so nato ocenjene ES, večina vrednosti ostalih parametrov pa je, če ni lokalno merjenih podatkov, pridobljena z ekspertnimi ocenami in/ali modeliranjem, ki so dodaten vir negotovosti. Ocene ES tako zasnovanih študij so posledično lahko zelo subjektivne in potencialno zavajajoče.

V Sloveniji je bil do sedaj predstavljen le pojem ES tal (Vrščaj 2017), medtem ko izvedbena raven, ki vključuje izbor kazalnikov, merilnih in analitskih metod za njihovo spremljanje ter oceno vrednosti ES tal, še ni bila izvedena. Na podlagi pregleda objavljenih raziskav ugotavljamo, da moramo pri izboru fizikalnih, kemijskih in biotskih kazalnikov ter metod za ocenjevanje ES tal upoštevati dostopnost obstoječih podatkov na nacionalni ravni, finančni in tehnični vidik izvedljivosti novih meritev ter prostorsko in časovno variabilnost meritev, še posebej pri biotskih kazalnikih (Barrios 2007; Griffiths s sodelavci 2016). Posebno pozornost je treba usmeriti v določevanje referenčnih vrednosti kazalnikov v odvisnosti od pedogeografskih razmer in rabe tal, ki vplivajo na interpretacijo izmerjenih vrednosti. Treba se je zavedati, da s spremljanjem izbranih fizikalnih, kemijskih in biotskih kazalnikov, pridobimo le delen uvid v kakovost tal in procese, ki potekajo v zapletenem talnem ekosistemu.

Ključni vrzeli v znanju sta izbor in razvoj kazalnikov kakovosti tal, ki so primerni za ocenjevanje ES (so prevedljivi v ciljne ES), so dovolj robustni (daljši nizi podatkov, ki omogočajo razumevanje variabilnosti) ter je možna njihova kvantitativna povezava z ES tal. Velik preboj znanosti na tem področju obetajo nedavne dejavnosti Evropske komisije, ki je med pet ključnih misij uvrstila tudi »Zdravje tal in hrana« (Mission Soil Health and Food), v sklopu katere posebno pozornost namenja prav učinkovitejšemu spremljanju stanja zdravja tal in ES ter s tem učinkovitejšemu spremljanju učinkov sprejetih ukrepov v okviru celotne misije.

Zahvala: Avtorji se zahvaljujemo finančni podpori v okviru: CRP projekta V4-2023: Ovrednotenje ekosistemskih storitev tal v kmetijski rabi (ARRS, MKGP), EJP Soil projekta MINOTAUR: Modeling and mapping soil biodiversity patterns and functions across Europe (EC, MKGP) ter programa P4-0085: Agroekosistemi (ARRS). Zahvaljujemo se tudi obema recenzentoma za konstruktivne pripombe, ki so pripomogle k izboljšavi članka.

7 Viri in literatura

- Adhikari, K., Hartemink, A. E. 2016: Linking soils to ecosystem services – A global review. *Geoderma* 262. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2015.08.009>
- Aryal, K., Maraseni, T., Apan, A. 2022: How much do we know about trade-offs in ecosystem services? A systematic review of empirical research observations. *Science of the Total Environment* 806-3. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.151229>
- Bagstad, K. J., Cohen, E., Ancona, Z. H., McNulty, S. H., Sun G. 2018: The sensitivity of ecosystem service models to choices of input data and spatial resolution. *Applied Geography* 93. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apgeog.2018.02.005>
- Banwart, S. A., Nikolaidis, N. P., Zhu, Y.-G., Peacock, C. L., Sparks, D. L. 2019: Soil functions: Connecting Earth's critical zone. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences* 47. DOI: <https://doi.org/10.1146/annurev-earth-063016-020544>
- Barrios, E. 2007: Soil biota, ecosystem services and land productivity. *Ecological Economics* 64. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2007.03.004>
- Bartkowski, B., Bartke, S., Helming, K., Paul, C., Techen, A. K., Hansjürgens, B. 2020: Potential of the economic valuation of soil-based ecosystem services to inform sustainable soil management and policy. *PeerJ* 8. DOI: <https://doi.org/10.7717/peerj.8749>
- Bartkowski, B., Hansjürgens, B., Möckel, S., Bartke, S. 2018: Institutional economics of agricultural soil ecosystem services. *Sustainability* 10-7. DOI: <https://doi.org/10.3390/su10072447>

- Bastida, F., Zsolnay, A., Hernández, T., García, C. 2008: Past, present and future of soil quality indices: A biological perspective. *Geoderma* 147. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2008.08.007>
- Baveye, P. C., Baveye, J., Gowdy, J. 2016: Soil »ecosystem« services and natural capital: critical appraisal of research on uncertain ground. *Frontiers in Environmental Science* 4. DOI: <https://doi.org/10.3389/fenvs.2016.00041>
- Bennett, L. T., Mele, P. M., Annett, S., Kasel, S. 2010: Examining links between soil management, soil health, and public benefits in agricultural landscapes: an Australian perspective. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 139. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.agee.2010.06.017>
- Bouma, J. 2014: Soil science contributions towards sustainable development goals and their implementation: Linking soil functions with ecosystem services. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science* 177-2. DOI: <https://doi.org/10.1002/jpln.201300646>
- Bünemann, E. K., Bongiorno, G., Bai, Z., Creamer, R. E., De Deyn, G., de Goede, R., Fleskens, L., Geissen, V., Kuyper, T. W., Mäder, P., Pulleman, M., Sukkel, W., van Groenigen, J. W., Brussaard, L. 2018: Soil quality – a critical review. *Soil Biology and Biochemistry* 120. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2018.01.030>
- Calzolari, C., Ungaro, F., Filippi, N., Guermandi, M., Malucelli, F., Marchi, N., Staffilani, F., Tarocco, P. 2016: A methodological framework to assess the multiple contributions of soils to ecosystem services delivery at regional scale. *Geoderma* 261. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2015.07.013>
- Costanza, R., d'Arge, R., de Groot, R., Farber, S., Grasso, M., Hannon, B., Limburg, K., Naeem, S., O'Neill, R. V., Paruelo, J., Raskin, R. G., Sutton, P., van den Belt, M. 1997a: The value of the world's ecosystem services and natural capital. *Nature* 387. DOI: <https://doi.org/10.1038/387253a0>
- Costanza, R., Cumberland, J., Daly, H., Goodland, R., Norgaard, R. 1997b: *An Introduction to Ecological Economics*. Boca Raton.
- COST CA18237 2019: European Soil-Biology Data Warehouse for Soil Protection. Medmrežje: <https://www.cost.eu/actions/CA18237/> (26. 4. 2022).
- Daily, G. 1997: *Nature's Services: Societal Dependence on Natural Ecosystems*. Washington.
- Dazzi, C., Lo Papa, G. 2022: A new definition of soil to promote soil awareness, sustainability, security and governance. *International Soil and Water Conservation Research* 10-1. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.iswcr.2021.07.001>
- Debeljak, M., Trajanov, A., Kuzmanovski, V., Schröder, J., Sandén, T., Spiegel, H., Wall, D. P., de Broek, M. V., Rutgers, M., Bampa, F., Creamer, R. E., Henriksen, C. B. 2019: A field-scale decision support system for assessment and management of soil functions. *Frontiers in Environmental Science* 7. DOI: <https://doi.org/10.3389/fenvs.2019.00115>
- Dominati, E., Patterson, M., Mackay, A. 2010: A framework for classifying and quantifying the natural capital and ecosystem services of soils. *Ecological Economics* 69-9. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2010.05.002>
- Dominati, E., Mackay, A., Green, S., Patterson, M. 2014a: A soil change-based methodology for the quantification and valuation of ecosystem services from agro-ecosystems: A case study of pastoral agriculture in New Zealand. *Ecological Economics* 100. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2014.02.008>
- Dominati, E., Mackay, A., Lynch, B., Heath, N., Millner, I. 2014b: An ecosystem services approach to the quantification of shallow mass movement erosion and the value of soil conservation practices. *Ecosystem Services* 9. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ecoser.2014.06.006>
- Doran, J. W., Parkin, T. B. 1994: *Defining and assessing soil quality. Defining Soil Quality for a Sustainable Environment*. Madison.
- Doran, J. W., Parkin, T. B. 1996: Quantitative indicators of soil quality: a minimum data set. *Methods for Assessing Soil Quality*. Madison. DOI: <https://doi.org/10.2136/sssaspecpub49>
- Drobnik, T., Greiner, L., Keller, A., Grêt-Regamey, A. 2018: Soil quality indicators – From soil functions to ecosystem services. *Ecological Indicators* 94. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2018.06.052>

- Duval, M. E., Galantini, J. A., Martinez, J. M., Lopez, F. M., Wall, L. G. 2016: Sensitivity of different soil quality indicators to assess sustainable land management: Influence of site features and seasonality. *Soil and Tillage Research* 159. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.still.2016.01.004>
- Ellili-Bargaoui, Y., Walter, C., Lemerrier, B., Michot, D. 2021: Assessment of six soil ecosystem services by coupling simulation modelling and field measurement of soil properties. *Ecological Indicators* 121. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2020.107211>
- EASAC 2018: Opportunities for soil sustainability in Europe. Policy report 36, EASAC Secretariat. Halle.
- European Commission 2006: Thematic Strategy for Soil Protection. Commission of the European Communities. Brussels.
- European Commission 2022: A Soil Deal for Europe – 100 living labs and lighthouses to lead the transition towards healthy soils by 2030. Medmrežje: https://ec.europa.eu/info/sites/default/files/research_and_innovation/funding/documents/soil_mission_implementation_plan_final_for_publication.pdf (15. 3. 2022).
- European Environment Agency 2019: The European environment: state and outlook 2020: knowledge for transition to a sustainable Europe. Luxembourg. DOI: <https://data.europa.eu/doi/10.2800/085135>
- Faber, J. H., Cousin, I., Meurer, K. H. E., Hendriks, C. M. J., Bispo, A., Viketoft, M., ten Damme, L., Montagne, D., Hanegraaf, M. C., Gillikin, A., Kuikman, P., Obiang-Ndong, G., Bengtsson, J., Taylor, A. 2022: Stocktaking for Agricultural Soil Quality and Ecosystem Services Indicators and their Reference Values. Report, EJP SOIL Internal Project SIREN Deliverable 2.
- Glenk, K., McVittie, A., Moran, D. 2012: Soil and Soil Organic Carbon within an Ecosystem Services Approach Linking Biophysical and Economic Data. Cupar.
- Greiner, L., Keller, A., Grêt-Regamey, A., Papritz, A. 2017: Soil function assessment: review of methods for quantifying the contributions of soils to ecosystem services. *Land Use Policy* 69. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2017.06.025>
- Grêt-Regamey, A., Sirén, E., Brunner, S. H., Weibel, B. 2017: Review of decision support tools to operationalize the ecosystem services concept. *Ecosystem Services* 26-B. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ecoser.2016.10.012>
- Griffiths, B. S., Römbke, J., Schmelz, R. M., Scheffczyk, A., Faber, J. H., Bloem, J., Pérès, G., Cluzeau, D., Chabbi, A., Suhadolc, M., Sousa, J. P., Martins Da Silva, P., Carvalho, F., Mendes, S., Morais, P., Francisco, R., Pereira, C., Bonkowski, M., Geisen, S., Bardgett, R. D., De Vries, F. T., Bolger, T., Dirilgen, T., Schmidt, O., Winding, A., Hendriksen, N. B., Johansen, A., Philippot, L., Plassart, P., Bru, D., Thomson, B., Griffiths, R. I., Bailey, M. J., Keith, A., Rutgers, M., Mulder, C., Hannula, S. E., Creamer, R., Stone, D. 2016: Selecting cost effective and policy-relevant biological indicators for European monitoring of soil biodiversity and ecosystem function. *Ecological Indicators* 69. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2016.04.023>
- Haines-Young, R., Potschin, M., Chesire, D. 2006: Defining and Identifying Environmental Limits for Sustainable Development. Full technical report, DEFRA Overview Report Project Code NR0102. Nottingham.
- Haines-Young, R., Potschin, M. B. 2018: Common International Classification of Ecosystem Services (CICES): V5.1 and Guidance on the Application of the Revised Structure. Nottingham.
- Helming, K., Daedlow, K., Paul, C., Techen, A. K., Bartke, S., Bartkowski, B., Kaiser, D., Wollschläger, U., Vogel, H.-J. 2018: Managing soil functions for a sustainable bioeconomy-assessment framework and state of the art. *Land Degradation and Development* 29-9. DOI: <https://doi.org/10.1002/ldr.3066>
- Hewitt, A., Dominati, E., Webb, T., Cuthill, T. 2015: Soil natural capital quantification by the stock adequacy method. *Geoderma* 241. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2014.11.014>
- Jónsson, J. Ö. G., Davíðsdóttir, B., Nikolaidis, N. P. 2017: Valuation of soil ecosystem services. *Advances in Agronomy* 142. DOI: <https://doi.org/10.1016/bs.agron.2016.10.011>
- Karlen, D. L., Andrews, S. S., Doran, J. W. 2001: Soil quality: current concepts and applications. *Advances in Agronomy* 74. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0065-2113\(01\)74029-1](https://doi.org/10.1016/S0065-2113(01)74029-1)

- Keesstra, S. D., Bouma, J., Wallinga, J., Tittonell, P., Smith, P., Cerdà, A., Montanarella, L., Quinton, J. N., Pachepsky, Y., van der Putten, W. H., Bardgett, R. D., Moolenaar, S., Mol, G., Jansen, B., Fresco, L. O. 2016: The significance of soils and soil science towards realization of the United Nations Sustainable Development Goals. *Soil* 2-2. DOI: <https://doi.org/10.5194/soil-2-111-2016>
- Lilburne, L., Eger, A., Mudge, P., Ausseil, A. G., Stevenson, B., Herzig, A., Beare, M. 2020: The Land Resource Circle: supporting land-use decision making with an ecosystemservice-based framework of soil functions. *Geoderma* 363. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2019.114134>
- MAES 2018: Mapping and Assessment of Ecosystems and their Services; Soil ecosystems. Report 1.2. Luxembourg. DOI: <https://doi.org/10.2779/41384>
- Martins, M. D. R., Angers, D. A. 2015: Different plant types for different soil ecosystem services. *Geoderma* 237. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2014.09.013>
- MEA 2005: Ecosystems and Human Wellbeing: Synthesis. Washington. Medmrežje: <https://www.millenniumassessment.org/documents/document.356.aspx.pdf> (26. 4. 2022).
- Medmrežje 1: <https://esdac.jrc.ec.europa.eu/projects/lucas> (26. 4. 2022).
- Medmrežje 2: <https://ec.europa.eu/> (26. 4. 2022).
- Medmrežje 3: <https://ejpsoil.eu> (26. 4. 2022).
- Merrington, G. 2006: The Development and Use of Soil Quality Indicators for Assessing the Role of Soil in Environmental Interactions. The Environment Agency Science Report SC030265. Bristol.
- Mooney, H., Ehrlich, P. 1997: Ecosystem services: A fragmentary history. *Nature's Services: Societal Dependence on Natural Ecosystems*. Washington.
- Motiejūnaitė, J., Børja, I., Ostonen, I., Bakker, M. R., Bjarnadottir, B., Brunner, I., Iršėnaitė, R., Mrak, T., Oddsdóttir E. S., Lehto, T. 2019. Cultural ecosystem services provided by the biodiversity of forest soils: A European review. *Geoderma* 343. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2019.02.025>
- Paul, C., Kuhn, K., Steinhoff-Knopp, B., Weißhuhn, P., Helming, K. 2020: Towards a standardization of soil-related ecosystem service assessments. *European Journal of Soil Science* 72-4. DOI: <https://doi.org/10.1111/ejss.13022>
- Pereira, P., Bogunovic, I., Muñoz-Rojas, M., Brevik, E. C. 2018: Soil ecosystem services, sustainability, valuation and management. *Current Opinion in Environmental Science and Health* 5. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.coesh.2017.12.003>
- Pulleman, M., Creamer, R., Hamer, U., Helder, J., Pelosi, C., Pérès, G., Rutgers, M. 2012: Soil biodiversity, biological indicators and soil ecosystem services—an overview of European approaches. *Current Opinion in Environmental Sustainability* 4. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cosust.2012.10.009>
- Robinson, D. A., Lebron, I., Vereecken, H. 2009: On the definition of the natural capital of soils: A framework for description, evaluation, and monitoring. *Soil Science Society of America Journal* 73. DOI: <https://doi.org/10.2136/sssaj2008.0332>
- Robinson, D. A., Lebron, I. 2010: On the natural capital and ecosystem services of soils. *Ecological Economics* 70. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2010.08.012>
- Rodrigues, A. F., Latawiec, A. E., Reid, B. J., Solórzano, A., Schuler, A. E., Lacerda, C., Fidalgo, E. C. C., Scarano, F. R., Tubenchlak, F., Pena, I., Vicente-Vicente, J. L., Korys, K. A., Cooper, M., Fernandes, N. F., Prado, R. B., Maioli, V., Dib, V., Teixeira, W. G. 2021: Systematic review of soil ecosystem services in tropical regions. *Royal Society Open Science* 8-3. DOI: <https://doi.org/10.1098/rsos.201584>
- Rutgers, M., Mulder, C., Schouten, A., Bloem, J., Bogte, J., Breure, A., Brussaard, L., Goede, R. DeFaber, J., Keidel, H. 2008: Soil ecosystem profiling in the Netherlands with ten references for biological soil quality. RIVM report 607604009. Bilthoven.
- Rutgers, M., van Wijnen, H. J., Schouten, A. J., Mulder, C., Kuiten, A. M. P., Brussaard, L. 2012: A method to assess ecosystem services developed from soil attributes with stakeholders and data of four arable farms. *Science of Total Environment* 415. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2011.04.041>
- Rutgers, M., Jensen, J. 2011: Site-specific ecological risk assessment. *Dealing with Contaminated Sites*. Dordrecht. DOI: https://doi.org/10.1007/978-90-481-9757-6_15

- Sandén, T., Trajanov, A., Spiegel, H., Kuzmanovski, V., Saby, N. P. A., Picaud, C., Henriksen, C. B., Debeljak, M. 2019: Development of an agricultural primary productivity decision support model: A case study in France. *Frontiers in Environmental Sciences* 7. DOI: <https://doi.org/10.3389/fenvs.2019.00058>
- Schon, N. L., Dominati, E. J. 2020: Valuing earthworm contribution to ecosystem services delivery. *Ecosystem Services* 43. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ecoser.2020.101092>
- Schulte, R. P. O., Creamer, R. E., Donnellan, T., Farrelly, N., Fealy, R., O'Donoghue, C., O'hUallachain, D. 2014: Functional land management: a framework for managing soil-based ecosystem services for the sustainable intensification of agriculture. *Environmental Science and Policy* 38. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.envsci.2013.10.002>
- Schwilch, G., Bernet, L., Fleskens, L., Giannakis, E., Leventon, J., Marañón, T., Mills, J., Short, C., Stolte, J., van Delden, H., Verzandvoort, S. 2016: Operationalizing ecosystem services for the mitigation of soil threats: A proposed framework. *Ecological Indicators* 67. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2016.03.016>
- Suhadolc, M. 2013: Biotski indikatorji kakovosti tal. Novi izzivi v agronomiji 2013. Ljubljana.
- Šmid Hribar, M., Japelj, A., Vurunić, S. 2021: Systematic mapping of studies on ecosystem services in Slovenia. *Geografski vestnik* 93-1. DOI: <https://doi.org/10.3986/GV93101>
- TEEB 2010: The Economics of Ecosystems and Biodiversity Ecological and Economic Foundations. London, Washington.
- van Leeuwen, J. P., Saby, N. P. A., Jones, A., Louwagie, G., Micheli, E., Rutgers, M., Schulte, R. P. O., Spiegel, H., Toth, G., Creamer, R. E. 2017: Gap assessment in current soil monitoring networks across Europe for measuring soil functions. *Environmental Research Letters* 12. DOI: <https://doi.org/10.1088/1748-9326/aa9c5c>
- van Wijnen, H. J., Rutgers, M., Schouten, A. J., Mulder, C., de Zwart, D., Breure A. M. 2012: How to calculate the spatial distribution of ecosystem services – Natural attenuation as example from The Netherlands. *Science of the Total Environment* 415. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2011.05.058>
- Velasquez, E., Lavelle, P., Andrade, M. 2007: GISQ, a multifunctional indicator of soil quality. *Soil Biology and Biochemistry* 39-12. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2007.06.013>
- Vogel, H. J., Eberhardt, E., Franko, U., Lang, B., Liess, M., Weller, U., Wiesmeier, M., Wollschlager, U. 2019: Quantitative evaluation of soil functions: potential and state. *Frontiers in Environmental Science* 7. DOI: <https://doi.org/10.3389/fenvs.2019.00164>
- Vrščaj, B. 2017: Lastnosti, pestrost in ekosistemske storitve tal. Ljubljana.
- Wall, D. P., Delgado, A., O'Sullivan, L., Creamer, R. E., Trajanov, A., Kuzmanovski, V., Bugge Henriksen, C., Debeljak, M. 2020: A decision support model for assessing the water regulation and purification potential of agricultural soils across Europe. *Frontiers in Sustainable Food Systems* 4. DOI: <https://doi.org/10.3389/fsufs.2020.00115>

8 Summary: From soil quality to soil ecosystem services

(translated by the authors)

Soil quality is defined as the ability of soil to function as a vital living system within ecosystem boundaries and land use, to maintain plant and animal productivity, to maintain or improve water and air quality, and to support plant and animal health (Doran and Parkin 1994; 1996). Soil quality can also be defined as the continuous capacity of soil to support ecosystem services (ES), which are goods and benefits humans receive from nature. Soils provide human society with healthy food, quality feed, fibre and other biomass; store and purify water, regulate flows, recharge aquifers and mitigate the effects of droughts and floods; sequester carbon from the atmosphere and reduce greenhouse gas emissions from soils, thereby reducing the effects of climate change; enable nutrient cycling to support crop production, maintain and protect biodiversity by preserving habitats above and within the soil; support the

quality of our landscapes and cultural heritage. The concept of ES creates an understanding of the value of ecosystems to human well-being.

Estimating the benefits humans receive from ecosystems, i.e., ES valuation is emerging as one of the most important tools for assessing the sustainability of natural resource use that could be used to improve the management of natural resources. However, soil-related ES assessment is still under development and many challenges remain to fully applying the concept. For example, the linkages between soil quality and soil ecosystem services are very challenging due to the complexity of the soil ecosystem and the many intertwined interactions. There is no generally accepted methodology suitable for assessing individual soil-related ES in the EU. To date, only a few EU Member States have used national soil quality monitoring data to assess soil ES, and only for a limited number of ES. Not only do the ES assessment approaches differ from country to country, but also the terminology and definitions used in science, such as soil quality, soil functions and ecosystem services, may differ from a policy perspective.

The ES has only slowly penetrated the field of soil science, mainly through the concept of soil quality and functions. It is important to note that the term »soil function« can be used differently as a synonym for: 1) process, 2) operation, 3) role, and 4) service (Glenk et al. 2012; Baveye, Baveye and Gowdy 2016). As soil science has used the term »soil function« in a narrow and well-defined context for more than 50 years and has also served as a conceptual basis for a considerable amount of research and important policy-making work, such as the European Commission's Thematic Strategy on Soil (2006), the terminology of »soil function« has been preserved. However, defining the function of the soil and defining its boundaries is not easy, and both terms are often confused. Soil functions refer to natural biological processes, while ES refer to those functions that contribute to human well-being. The functions of the soil that provide ES are typically described by »flows, and transformations of mass, energy, and genetic information« (Banwart et al. 2019).

The concept of soil quality based on soil functions has made an important contribution to understanding the contribution of soil to ES and the importance of soil for human well-being (Figure 2). Soil functions can be defined as bundles of soil processes that support ES (Glenk, McVittie and Moran 2012; Haines-Young and Potschin 2018). Soil science identifies five main soil functions that provide ES: (i) primary production, (ii) water purification and regulation, (iii) carbon sequestration and climate regulation, (iv) biodiversity and habitat provision, and (v) provisioning and nutrient cycling (Rutgers et al. 2012; Bouma 2014; Schulte et al. 2014). In soil, all these functions take place simultaneously, but the extent and relative share of each function depend on many factors: (i) soil properties (physical, chemical and biological), (ii) environmental variables (temperature and precipitation regime, hydrology, slope), (iii) land use (arable land, grassland, forest), and (iv) soil management (e.g., drainage and irrigation, tillage, fertilization, plant protection, crop selection and crop rotation) (Schulte et al. 2014; Vogel et al. 2019).

A prerequisite for the operationalization of soil ES assessment is the availability of data and methods and/or tools. Soil quality is in general assessed by determining soil properties (*soil quality indicators*): physical, chemical, and biological (Suhadolc 2013; Bünneman et al. 2018). The selection of a minimum dataset derived from a more extensive set of soil quality indicators is a necessary step in soil quality assessments as well as in ES assessments.

It is important to underline that an indicator is only useful if its value can be unequivocally interpreted and reference values are available. Furthermore, there is also no generally accepted methodology suitable for assessing soil-related ES. The current ES assessments are based on two conceptual approaches: (i) The »bottom-up« concept, as conceived by soil science and soil ecology focuses on the direct life support functions of soils. This concept is generally process-oriented and limited to specific soil functions using a limited number of soil properties or processes related to soil type units to assess different soil functions. This approach was used by Rutgers et al. (2008; 2012) and in the LAND-MARK project (e.g., Debeljak et al. 2019; Sandén et al. 2019; Wall et al. 2020). However, the problem with implementing this approach is usually the lack of input data at both spatial and temporal scales.

(ii) The »top-down« oriented concept, largely driven by systems ecology and environmental economy in a more holistic, ecosystem approach. This concept is generally used for policy purposes, especially when a gap is identified between what is currently measured in soil assessment schemes and what should be measured to assess a particular function in terms of potential change, i.e., either losses (degradations) or improvements in function that can be influenced by management. An example of a top-down approach is the assessment of biodiversity and environmental impacts on a wider scale (ecosystems, landscapes) used in the MAES project (2018). The problem with current top-down approaches is an oversimplification and thus great uncertainty in estimates.

Many models and decision-support tools for assessing ES have emerged, which can be further grouped into the three approaches: i) indicator approaches that use simplified approximations based on key soil properties as indicators, ii) static approaches that apply empirical relationships to link soil properties to soil functions, and iii) dynamic approaches that apply biophysical methods to integrate soil, climate, and environmental factors to model soil processes over time.

It is important to underline that the extent to which estimates of ES approximate the actual distribution and representation of each ES in space is questionable. One problematic aspect of current tools is that due to the strong ecosystem bias that characterizes the bulk of the research on ES, the soil component is often completely ignored (Baveye, Baveye and Gowdy 2016). Integration of a more realistic representation of soil diversity, complexity (e.g., depth-distributions of soil properties), and soil spatial variation in soil-supported ES assessment thus appears necessary to reduce the uncertainty attached to traditional assessment methods, and ultimately to determine how land-use and land-management planning may be used to improve the ES delivery according to stakeholders and policy-makers preferences.

We conclude that high-quality soil input data, selection of robust soil quality indicators for ES assessment, and further development of models and tools for assessing soil functions and ES to reduce uncertainty are urgently needed for reliable soil-related ES assessments. This is particularly important when, beyond recognizing and increasing awareness of ES, one attempts to capture their value as requested for priority setting (e.g., identifying areas critical for ES provision) or instrument design (e.g., development of payment schemes for ES) (Bartkowski et al. 2020).